

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-383-390

УДК 621.43

Способы организации рабочего процесса газодизельного двигателя

Канд. техн. наук, доц. Г. А. Вершина¹⁾, асп. О. С. Быстренков¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017

Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. За последние десятилетия сокращение выбросов загрязняющих веществ стало одним из основных направлений для дальнейшего развития двигателестроения. Решение таких задач привело к внедрению каталитических систем доочистки, новых технологий впрыска топлива, технологии регулируемых фаз газораспределения, регулируемой системы турбонаддува и в последнее время – даже системы переменной степени сжатия двигателя. Применение газового топлива, в частности газодизельного процесса, может стать одним из средств по снижению загрязнения атмосферного воздуха токсичными веществами и удовлетворению растущих экологических норм. В связи с этим был проведен анализ способов организации рабочего процесса газодизельного двигателя. Показаны параметры, влияющие на характер протекания газодизельного процесса, приведены график удельного суммарного расхода теплоты от доли запальной порции дизельного топлива и зависимость показателей газодизеля от угла опережения впрыска запальной порции дизельного топлива. Приведена современная топливная система газодизельного двигателя ГД-243. Газодизельный двигатель обладает более совершенными экологическими характеристиками, чем двигатели, работающие на дизельном топливе или бензине. По данным Европейской ассоциации газомоторных транспортных средств, существенное снижение выбросов достигается при уровне замещения 50 % дизельного топлива газовым (метаном), при этом есть тенденция к еще большему их уменьшению. Для широкого использования газового топлива как топлива для газодизельного процесса необходимы организации нового рабочего процесса, улучшение топливной аппаратуры, совершенствование стратегий впрыска и управления подачей топлива. По проведенному анализу предложен способ организации рабочего процесса многоконтурного двигателя. Подана заявка на патент.

Ключевые слова: газодизельный двигатель, газовое топливо, дизельное топливо, рабочий процесс, выбросы вредных веществ, угол опережения впрыска, запальная порция дизельного топлива, предкамера

Для цитирования: Вершина, Г. А. Способы организации рабочего процесса газодизельного двигателя / Г. А. Вершина, О. С. Быстренков // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 5. С. 383–390. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-383-390

Methods for Organization of Working Process for Gas-Diesel Engine

G. A. Vershina¹⁾, O. S. Bystrenkov¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Over the past few decades reduction in pollutant emissions has become one of the main directions for further development of engine technology. Solution of such problems has led to implementation of catalytic post-treatment systems, new technologies of fuel injection, technology for regulated phases of gas distribution, regulated turbocharger system and, lately, even system for variable compression ratio of engine. Usage of gaseous fuel, in particular gas-diesel process, may be one of the means to reduce air pollution caused by toxic substances and meet growing environmental standards and regulations. In this regard, an analysis of methods for organization of working process for a gas-diesel engine has been conducted in the paper. The paper describes parameters that influence on the nature of gas diesel process, it contains graphics of specific total heat consumption according to ignition portion of diesel fuel and dependence of gas-diesel indices on advance angle for ignition portion injection of the diesel fuel. A modern fuel system of gas-diesel engine ГД-243 has been demonstrated in the paper. The gas-diesel engine has better environmental characteristics than engines running on diesel fuel or gasoline. According

Адрес для переписки

Вершина Георгий Александрович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-76-64
oup@bntu.by

Address for correspondence

Vershina Georgy A.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-76-64
oup@bntu.by

to the European Natural & bio Gas Vehicle Association a significant reduction in emissions is reached at a 50%-substitution level of diesel fuel by gas fuel (methane) and in such a case there is a tendency towards even significant emission decrease. In order to ensure widespread application of gaseous fuel as fuel for gas-diesel process it is necessary to develop a new working process, to improve fuel equipment, to enhance injection strategy and fuel supply control. A method for organization of working process for multi-fuel engine has been proposed on the basis of the performed analysis. An application has been submitted for a patent.

Keywords: gas-diesel engine, gas fuel, diesel fuel, working process, emissions of harmful substances, injection advance angle, ignition portion of diesel fuel, combustion pre-chamber

For citation: Vershina G. A., Bystrenkov O. S. (2017) Methods for Organization of Working Process for Gas-Diesel Engine. *Science and Technique*. 16 (5), 383–390. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-383-390 (in Russian)

Введение

Загрязнение атмосферного воздуха токсичными веществами является важной проблемой для большинства стран. В особенности данная проблема характерна для крупных городов с большим количеством автомобильного транспорта, так как на автомобилях в качестве силового агрегата используется двигатель внутреннего сгорания (ДВС). Рост токсичных выбросов двигателей внутреннего сгорания создает неприемлемую экологическую обстановку для окружающей атмосферы, которая ухудшается с течением времени. В связи с ростом количества автомобилей в крупных городах в местах сосредоточения автомобильного транспорта концентрация в воздухе вредных веществ, выбрасываемых с отработавшими газами, нередко превышает санитарные нормы в 15–30 раз [1, 2]. Прогнозы указывают на то, что дальнейшее увеличение количества автомобилей, а также других силовых установок с ДВС без эффективных природоохранных мероприятий недопустимо с экологической точки зрения. Поэтому перед двигателестроением стоит задача резкого уменьшения вредных выбросов с отработавшими газами.

Решение таких задач привело к внедрению каталитических систем доочистки, новых технологий впрыска топлива, технологии регулируемых фаз газораспределения, регулируемой системы турбонаддува и в последнее время – даже системы переменной степени сжатия двигателя. Такие технические решения в сочетании с электронным управлением в состоянии удовлетворить все более жесткие нормы выбросов, введенные законодательством.

Однако в силу того что отработавшие газы двигателей внутреннего сгорания, работающих на газовом топливе, значительно менее токсич-

ны, чем выбросы бензиновых и дизельных двигателей, применение газового топлива, в частности газодизельного процесса, может стать одним из средств по снижению загрязнения атмосферного воздуха токсичными веществами и удовлетворению растущих экологических норм.

Основная часть

По основному признаку – способу воспламенения – газодизели относятся к двигателям с принудительным воспламенением, так же как двигатели с воспламенением от искры (имеется в виду, что запальная порция дизельного топлива воспламеняется от сжатия и далее воспламеняет газовое топливо). Однако рабочий процесс в газодизелях отличается от рабочего процесса в двигателях с искровым зажиганием специфическими особенностями, связанными в первую очередь с заменой электрической искры в качестве источника зажигания порцией воспламеняющего дизельного топлива.

В газодизеле мощность источника зажигания значительно больше, чем в двигателях с искровым зажиганием. Кроме того, рабочая смесь поджигается не в одной точке у холодной стенки, а в центре заряда по поверхности распространения факела. Благодаря этому одна из важных положительных особенностей газодизельного процесса – значительное расширение границ возможного обеднения рабочей смеси.

Одним из способов является способ (рис. 1) [3–9], когда газовое топливо к двигателю поступает через регулятор давления (газовый редуктор), который поддерживает давление газа на некотором постоянном уровне, и затем через смеситель, где газ смешивается в нужной пропорции с воздухом. Регулирование количества газозооушной смеси, направляющейся к

цилиндрам двигателя, может осуществляться либо с помощью управляемой дроссельной заслонки, либо клапаном или золотником, что характерно для мощных многоцилиндровых двигателей, когда смеситель ставят на каждый цилиндр (а не общий на весь двигатель). В конце такта сжатия дизельное топливо через форсунку впрыскивается в нагретую газозоудшную смесь и, воспламенившись, зажигает ее.

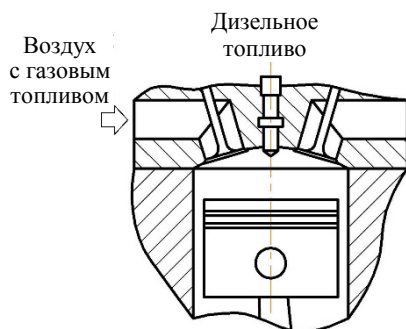


Рис. 1. Газодизель с одной форсункой для подачи дизельного топлива

Fig. 1. Gas-diesel engine with one injector for supplying diesel fuel

Данный способ позволяет существенно снизить объем отработавших газов, улучшает экологические показатели двигателей, уменьшает токсичность и дымность выхлопа и содержание в нем твердых частиц (сажи) благодаря чистоте газового топлива и обеднению рабочей смеси. Однако из-за обеднения смеси газодизель теряет до 6 % мощности, снижаются его динамические качества.

Другой способ реализации данного процесса (рис. 2) заключается в том, что воздух сжимается в цилиндре двигателя и газовое топливо впрыскивают в сжатый воздух через инжектор в конце такта сжатия [4]. Второй инжектор вводит пусковое топливо в камеру сгорания. Давление и температура внутри камеры являются достаточными для обеспечения самовоспламенения пускового топлива, которое в свою очередь воспламеняет газозоудшную смесь.

Двигатели данного типа требуют наличия двух отдельных инжекторов (один для газа и один для пускового топлива), более того, вспомогательное оборудование, которое необходимо установить рядом с двигателем для подачи двух видов топлива в каждый инжектор, делает двигатель значительно более сложным и доро-

гостоящим по сравнению с обычным дизельным двигателем.

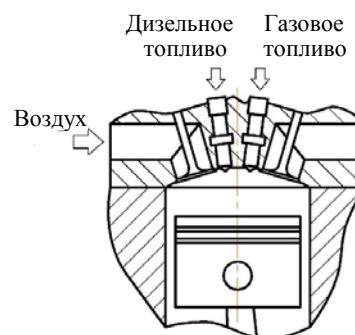


Рис. 2. Газодизель с двумя форсунками для подачи дизельного и газового топлива

Fig. 2. Gas-diesel engine with two injectors for supplying diesel and gas fuel

Также существует способ (рис. 3), который применяется обычно в мощных стационарных и судовых дизелях, работающих в узких диапазонах скоростных и нагрузочных режимов, где расход запальной дозы топлива составляет 5–10 % подачи топлива при номинальном режиме работы дизеля [3]. Такой расход может быть достигнут только при использовании специальной аппаратуры с уменьшенными размерами плунжера насоса. Поэтому на таких двигателях устанавливают по два комплекта насосов и форсунок.

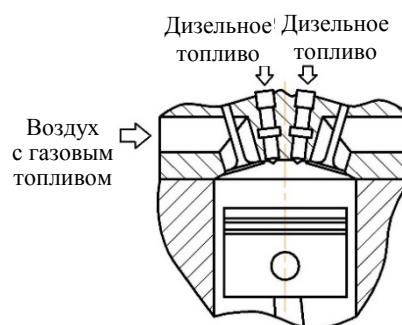


Рис. 3. Газодизель с двумя форсунками для подачи дизельного топлива

Fig. 3. Gas-diesel engine with two injectors for supplying diesel fuel

На газодизельных двигателях также может применяться форкамерно-факельное зажигание (рис. 4). Предкамера является предварительной камерой сгорания, объем которой составляет около 30 % от общего объема основной камеры сгорания. Назначением данного

решения выступают улучшение наполнения цилиндров, более эффективная организация газовых потоков в основной камере, а также повышение качества смесеобразования. В этом случае запальная порция дизельного топлива впрыскивается в форкамеру или вихрекамеру, где происходит его самовоспламенение. Предкамера (вихрекамера) соединяется с основной камерой специальными сопловыми каналами, через которые в основную камеру прорывается пламя. От контакта с ними смесь воздуха и газового топлива, находящаяся в основной камере сгорания, также воспламеняется.

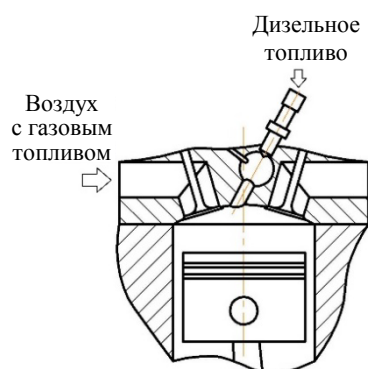


Рис. 4. Газодизель с предкамерой
Fig. 4. Gas-diesel engine with pre-chamber

На характер газодизельного процесса существенное влияние оказывают два параметра [3]:

1) доля теплоты, вводимой с воспламеняющим жидким топливом, $q_{ж} = Q_{ж}/(Q_{г} + Q_{ж})$, где $Q_{ж}$ – теплота, внесенная с жидким топливом; $Q_{г}$ – теплота, внесенная с газом;

2) угол опережения впрыска дизельного топлива θ .

Влияние $q_{ж}$ на показатели рабочего процесса определяют зависимости (рис. 5), полученные на одноцилиндровой установке. Минимально допустимую дозу воспламеняющего дизельного топлива при каждой нагрузке определяли как границу устойчивой работы двигателя, характеризовавшуюся резким увеличением неидентичности последовательных рабочих циклов и появлением пропусков воспламенения.

Минимальная доза воспламеняющего дизельного топлива увеличивается с уменьшением нагрузки как по абсолютной ($G_{ж}$), так и по относительной ($q_{ж}$) величине – при 100%-й

нагрузке достаточно было 5 % воспламеняющего дизельного топлива для обеспечения устойчивой работы газодизеля, а при 25%-й нагрузке для этого потребовалось уже $q_{ж} = 18$ %. При этом необходимая подача дизельного топлива возросла с 1,70 до 4,15 кг/ч.

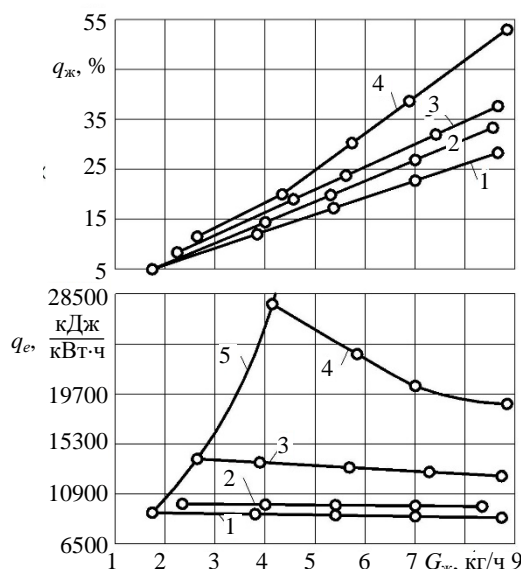


Рис. 5. Зависимость удельного суммарного расхода теплоты от доли запальной порции дизельного топлива:
1 – 100 % N_e ; 2 – 75 % N_e ; 3 – 50 % N_e ; 4 – 25 % N_e ; 5 – q_{emin}

Fig. 5. Dependence of total heat consumption rate on diesel fuel amount in ignition portion:
1 – 100 % N_e ; 2 – 75 % N_e ; 3 – 50 % N_e ; 4 – 25 % N_e ; 5 – q_{emin}

С увеличением $q_{ж}$ наблюдается уменьшение удельного расхода теплоты q_e , незначительного при больших нагрузках и более существенного при малых. Другие параметры рабочего процесса (максимальное давление цикла, температура выхлопных газов и пр.) мало зависят от $q_{ж}$.

Влияние на показатели газодизельного процесса угла θ опережения впрыска воспламеняющего топлива определяют приведенные на рис. 6 зависимости. Удельный расход теплоты q_e уменьшается при увеличении угла θ – заметно при малых нагрузках и незначительно при больших. Однако применению оптимальных углов опережения впрыска при больших нагрузках препятствует значительное повышение максимального давления цикла и скорости нарастания давления на участке сгорания до P_{max} , что объясняется уже отмеченным увеличением задержки воспламенения при переходе от дизельного процесса к газодизельному.

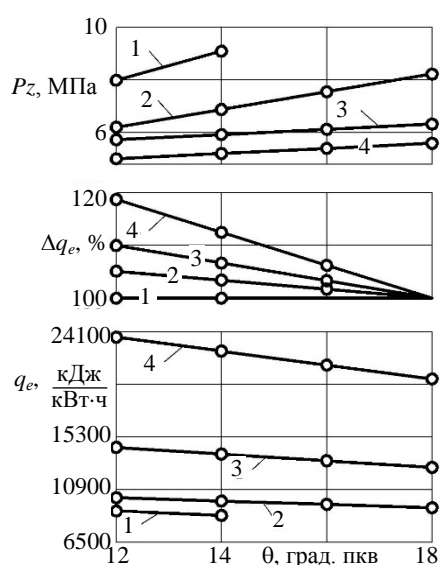


Рис. 6. Зависимость показателей газодизеля от угла опережения впрыска запальной порции дизельного топлива: 1 – 100 % N_e ; 2 – 75 % N_e ; 3 – 50 % N_e ; 4 – 25 % N_e

Fig. 6. Dependence of gas-diesel engine indices on injection advance angle of diesel fuel ignition portion: 1 – 100 % N_e ; 2 – 75 % N_e ; 3 – 50 % N_e ; 4 – 25 % N_e

Приведенные данные указывают на целесообразность изменения доли воспламеняющего топлива $q_{ж}$ и угла θ опережения впрыска при регулировании нагрузки газодизеля. Однако это

представляет значительные технические трудности даже на современных двигателях с электронным управлением впрыска топлива.

Современное конструктивное исполнение системы газодизельного двигателя можно рассмотреть на примере газодизеля ГД-243.

Газодизель ГД-243 предназначен для тракторов сельскохозяйственного назначения, коммунального хозяйства, дорожной и строительной техники [10]. На нем установлена современная топливная система (рис. 7), которая состоит из двух топливных систем для подачи газового и дизельного топлива.

Газодизельный двигатель способен работать как по газодизельному циклу, так и на чистом дизельном топливе. В газодизельном режиме в качестве газомоторного топлива используются компримированный природный газ (метан) и запальная доза дизельного топлива. При этом замещение дизельного топлива газом достигает до 70 % на режиме номинальной мощности.

Компримированный природный газ хранится в баллонах, установленных на технике, под давлением до 20 МПа. Баллоны оснащаются вентилями с автоматическим противопожарным клапаном. Газ из баллонов под давлением 20 МПа поступает в двухступенчатый редуктор высокого давления. Редуктор понижает давление газа с 20 МПа до 2–4 бар.

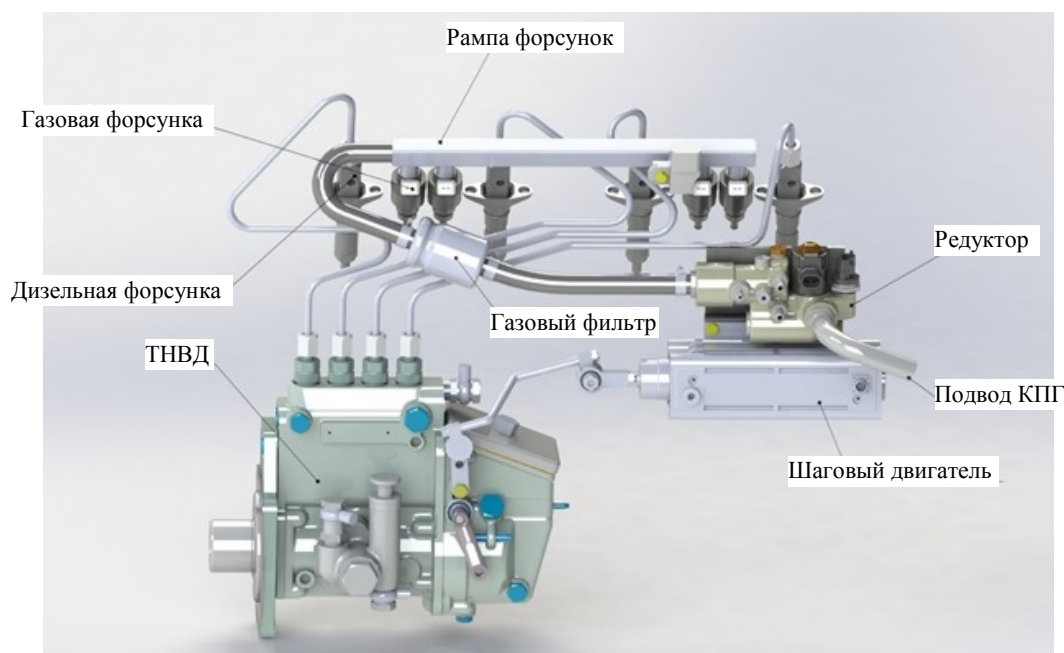


Рис. 7. Топливная аппаратура газодизельного двигателя ГД-243

Fig. 7. Fuel injection equipment of gas-diesel engine ГД-243

Из редуктора газ через газовый фильтр поступает в газовую рампу. Редуктор высокого давления поддерживает постоянное давление в рампе на уровне до 4 бар.

На рычаге управления подачей топлива ТНВД через специальный механизм смонтирован датчик положения рейки ТНВД, который следит за положением рейки при задании водителем (механиком) желаемой частоты вращения коленчатого вала.

Ограничение подачи топлива производится шаговым двигателем путем воздействия на рейку ТНВД через рычаг останова. Управление происходит за счет ограничения хода рейки ТНВД.

Пуск газодизеля производится только в дизельном режиме. Перевод в газодизельный режим осуществляется водителем (механиком) при помощи специальной кнопки переключения видов топлива, установленной в кабине трактора (транспортного средства). Перевод дизеля в газодизельный режим газа происходит только после достижения температуры охлаждающей жидкости 38–40 °С. Для этого редуктор высокого давления оснащен датчиком температуры ОЖ и соединен с системой охлаждения газодизеля для исключения замерзания редуктора от перепада давления газа.

Управление подачей газа осуществляется при помощи электронного блока управления (ЭБУ) за счет времени открытия газовой форсунки.

Для точного дозирования количества подаваемого газа на газодизеле установлены:

- датчик частоты вращения коленчатого вала;
- датчик положения распредвала.

На газодизельном двигателе устанавливается модифицированный ТНВД-004, отличающийся от штатного ТНВД наличием механизма установки запальной дозы (МУЗД). МУЗД предназначен для ограничения подачи дизельного топлива при работе двигателя в газодизельном режиме, а также для автоматического регулирования подачи газа в двигатель с помощью штатного регулятора частоты вращения.

В газодизельном режиме, так же как и в дизельном, регулятор осуществляет всережимное регулирование частоты вращения.

По проведенному анализу подана заявка на патент. Задача, на решение которой направлено заявленное изобретение, заключается в сниже-

нии общего выброса вредных веществ с отработавшими газами, а также в повышении надежности и долговечности двигателя.

Технический результат достигается применением газового топлива наряду с бензином и дизельным топливом и возможностью управления составом рабочей смеси (соотношением воздуха, бензина, газового и дизельного топлива) на различных режимах работы двигателя, управлением начала впрыска, его продолжительностью и режимами работы систем впрыска.

Применение предкамерного способа смесеобразования приведет к более низкому, чем у двигателей с непосредственным впрыском, максимальному давлению сгорания и уменьшению жесткости работы, что, в свою очередь, повысит надежность и долговечность двигателя. Конструктивный способ реализации данного изобретения приведен на рис. 8.

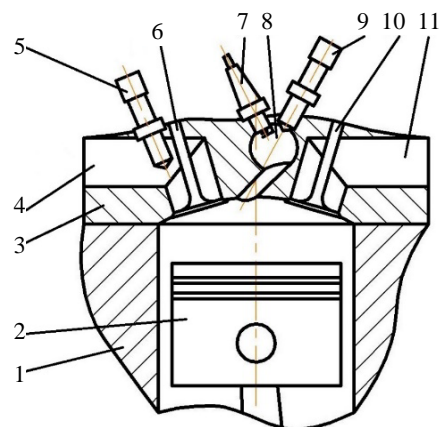


Рис. 8. Конструктивная реализация способа

Fig. 8. Constructive implementation of method

На блок цилиндров 1 устанавливается головка блока цилиндров 3. В цилиндре двигателя находится поршень 2, который через шатун соединен с коленчатым валом двигателя (не показаны). В головке блока цилиндров 3 находятся впускной канал 4 и впускной клапан 6, предназначенные для подачи рабочей смеси в цилиндр двигателя, а также выпускной канал 11 и выпускной клапан 10, предназначенные для отвода отработавших газов из цилиндра двигателя. Форсунка 5 установлена в головке блока цилиндров 3 таким образом, чтобы ее распылитель располагался во впускном канале над впускным клапаном. Форсунка 9 уста-

навливается таким образом, чтобы ее распылитель находился в форкамере 8. Форкамера соединена узким каналом с цилиндром двигателя. Также в форкамеру устанавливается свеча зажигания 7.

При движении поршня вниз (такт впуска) через открывшийся впускной клапан из впускного канала в цилиндр двигателя поступают газозоудная смесь и бензин, впрыскиваемый форсункой 5. При движении поршня вверх впускной клапан закрывается и рабочая смесь начинает сжиматься в цилиндре двигателя (такт сжатия). Запальная порция дизельного топлива впрыскивается в форкамеру форсункой 9. Воспламенившееся в форкамере дизельное топливо, расширяясь, проходит через канал, соединяющий форкамеру и цилиндр двигателя, и воспламеняет рабочую смесь в цилиндре двигателя (в конце такта сжатия). Рабочая смесь, сгорая, расширяется и заставляя поршень двигаться вниз (рабочий ход). При дальнейшем движении поршня открывается выпускной клапан 10, и отработавшие газы через выпускной канал 11 выходят из цилиндра двигателя (такт выпуска). Момент впрыска дизельного топлива и бензина, продолжительность и схема впрыска в зависимости от режима работы двигателя задаются электронным блоком управления (не показан). Также на отдельных режимах двигатель может работать без дизельного топлива, тогда рабочая смесь будет состоять из газового топлива, бензина и воздуха. В этом случае рабочая смесь воспламеняется от свечи зажигания. На некоторых режимах двигатель может работать по газодизельному процессу. Количество газового топлива и воздуха может регулироваться различными способами (управляемая дроссельная заслонка и др.).

Обсуждение результатов

Двигатель, работающий в газодизельном режиме, обладает более совершенными экологическими характеристиками, чем двигатель, работающий на дизельном топливе. Однако

степень уменьшения эмиссии экологических вредных веществ сильно зависит от режима работы двигателя и степени замещения дизельного топлива газовым.

По данным Европейской ассоциации газомоторных транспортных средств, при уровне замещения 50 % дизельного топлива газовым (метаном) достигается существенное снижение выбросов (рис. 9), при этом есть тенденция к еще большему их уменьшению [11].

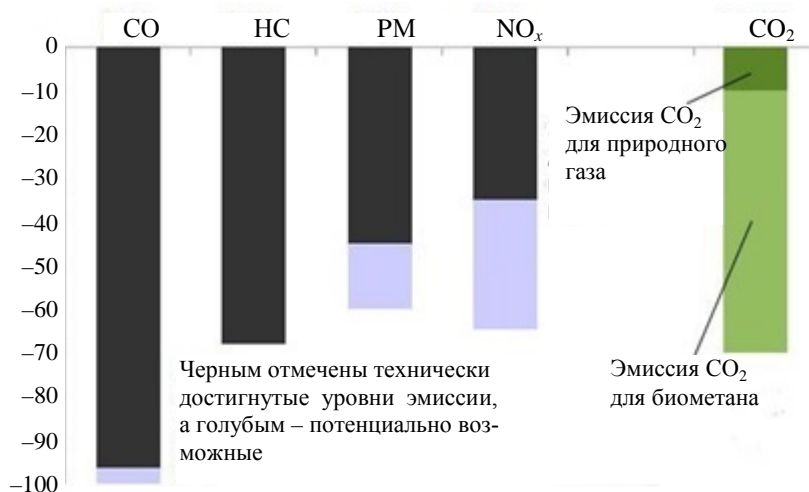


Рис. 9. Диаграмма снижения выбросов

Fig. 9. Diagram of emission reduction

Поскольку основной заряд газовый, а горючая смесь готовится не непосредственно в цилиндре, а на некотором удалении от него, газодизелю присуща некоторая инерционность, его реакция на манипуляции педалью газа запаздывает. Чем ближе к цилиндру инжектируется газовый заряд, тем лучше реакция двигателя. В идеале газ должен впрыскиваться непосредственно в цилиндр, причем несколькими форсунками для оптимального смесеобразования.

ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ способов организации рабочего процесса газодизельного двигателя, конструктивных особенностей топливной аппаратуры современного газодизельного двигателя. Намечены проблемы и дальнейшие направления для развития и совершенствования газодизельного двигателя.

2. Для продвижения газового топлива как топлива для двигателей необходимы организа-

ции нового рабочего процесса, улучшение топливной аппаратуры, совершенствование стратегий впрыска и управлением подачей топлива.

3. По проведенному анализу предложен способ организации рабочего процесса много-топливного двигателя, подана заявка на патент.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горбунов, В. В. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В. В. Горбунов, Н. Н. Патрахальцев. М.: Изд-во РУДН, 1998. 214 с.
2. Жегалин, О. И. Снижение токсичности автомобильных двигателей / О. И. Жегалин, П. Д. Лупачев. М.: Транспорт, 1985. 120 с.
3. Генкин, К. И. Газовые двигатели / К. И. Генкин. М.: Машиностроение, 1977. 196 с.
4. Газовый двигатель: пат. № 2369754. Рос. Федерации / Мария Бюсвеен, Терье Алмос, Роберт Йоргенсен, Фроде Квинге; дата публ. 10.10.2009.
5. Самоль, Г. И. Газобаллонные автомобили / Г. И. Самоль, И. И. Гольдблат. М.: Автотрансиздат, 1961. 142 с.
6. Демьянов, Л. А. Многотопливные двигатели / Л. А. Демьянов, С. К. Сарафанов. М.: Воениздат, 1968. 104 с.
7. Генкин, К. И. Газовые двигатели / К. И. Генкин. М.: Машгиз, 1962. 116 с.
8. Газобаллонные автомобили / Е. Г. Григорьев [и др.]; под общ. ред. И. А. Хороманской. М.: Машиностроение, 1989. 216 с.
9. Коллеров, Л. К. Газовые двигатели поршневого типа / Л. К. Коллеров. Л.: Машиностроение, 1968. 248 с.
10. Газодизель ГД-243: Дополнение к руководству по эксплуатации 243-0000100РЭ (дизели Д-243, Д-245 и их модификации). Введ. 11.12.2014. Минск: ОАО «УКХ «ММЗ». 12 с.
11. Газодизель. Чистая энергия [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://ce-fund.ru/node/56>.

Поступила 09.06.2017

Подписана в печать 15.08.2017

Опубликована онлайн 29.09.2017

REFERENCES

1. Gorbunov V. V., Patrakhaltsev N. N. (1998) *Toxicity Level of Internal-Combustion Engine*. Moscow, Russian University of Peoples' Friendship. 214 (in Russian).
2. Zhegalin O. I. Lupachiov P. D. (1985) *Reduction of Automobile Engine Toxicity*. Moscow, Transport Publ. 120 (in Russian).
3. Genkin K. I. (1977) *Gas Engines*. Moscow, Mashinostroyenie Publ. 196 (in Russian).
4. Bysveen M., Almås T., Jørgensen R., Kvinge F. (2009) *Gas Engine*. Patent Russian Federation No 2369754 (in Russian).
5. Samol G. I., Goldblat I. I. (1961) *Compressed-Gas Vehicles*. Moscow, Publishing House "Avtotransizdat". 142 (in Russian).
6. Demianov L. A., Sarafanov S. K. (1968) *Multifuel Engines*. Moscow, Publishing House "Voenizdat". 104 (in Russian).
7. Genkin K. I. (1962) *Gas Engines*. Moscow, Publishing House "Mashgiz". 116 (in Russian).
8. Grigor'ev E. G., Kolubaev B. D., Erokhov V. I., Zubarev A. A., Khoromanskaya I. A. (1989) *Compressed-Gas Vehicles*. Moscow, Mashinostroyenie Publ. 216 (in Russian).
9. Kollerov L. K. (1968) *Gas Engines of Piston-Type*. Leningrad, Mashinostroyenie Publ. 248 (in Russian).
10. Minsk Motor Plant (2014) ГД-243-Gas-Diesel: 243-0000100РЭ-Operational Manual Supplement (Diesels Д-243, Д-245 and their Modifications). Minsk. 12 (in Russian).
11. Gas-Diesel. *Clean Energy*. Available at: <http://www.ce-fund.ru/node/56> (in Russian).

Received: 09.06.2017

Accepted: 15.08.2017

Published online: 29.09.2017